

基于轨迹分析的2003—2010年华东地区土地覆被变化对土壤水分的影响研究

辛强, 李兆富, 李瑞娟, 郭泰, 吴敏, 潘剑君

(南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘要: [目的] 分析华东地区土地覆被变化过程对土壤水分的影响, 以期能够揭示土地覆被变化对土壤水分的影响机理。[方法] 应用 MODIS 三级土地覆被产品 $MCD12Q1$, 采用轨迹分析方法描述 2003—2010 年耕地和林地轨迹变化过程; 选择基于 AMSR-E 土壤水分数据的降尺度反演结果作为描述土壤水分变化的数据, 研究华东地区土地覆被变化对土壤水分的影响。[结果] (1) 每种土地覆被类型均有 3 种轨迹变化形式: 研究年限内面积增加的轨迹、面积减少的轨迹、研究年限内未发生面积变化的轨迹; (2) 在耕地和林地 3 种轨迹变化过程中, 土壤水分含量均表现出下降的趋势。(3) 在林地的 3 种轨迹变化过程中, 土壤水分含量大小顺序为: 未发生轨迹变化的林地 > 林地面积增加的轨迹 > 林地面积减少的轨迹; 在耕地的 3 种轨迹变化过程中, 土壤水分含量大小排序为: 耕地面积减少的轨迹 > 耕地面积增加的轨迹 > 未发生轨迹变化的耕地; (4) 耕地、林地轨迹变化过程对土壤水分的影响均与时间年限有关, 至少需要 7 a 林地土壤水分含量达到最大值, 此时耕地土壤水分含量达到最小值。[结论] 作为华东地区主要的土地覆被类型, 耕地和林地 在 2003—2010 年的所有变化轨迹过程中, 土壤水分均呈现下降趋势, 且土壤水分随着育林年限和耕种年限的增长分别增加和减小, 并在第 7 a 分别达到最大和最小。

关键词: 华东地区; 土壤水分; 轨迹分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0031-09

中图分类号: S152.7

文献参数: 辛强, 李兆富, 李瑞娟, 等. 基于轨迹分析的 2003—2010 年华东地区土地覆被变化对土壤水分的影响研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 031-39. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.006

Impacts of Land Cover Change on Soil Moisture in 2003—2010 Based on Trajectory Analysis

XIN Qiang, LI Zhaofu, LI Ruijuan, GUO Tai, WU Min, PAN Jianjun

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] Studying the links of the change process of vegetation cover and soil moisture in East China, to reveal the impact mechanism of the former to the later. [Methods] This research described the variation of cropland and forest by trajectory analysis using MODIS $MCD12Q1$ and researched the soil moisture variation caused by land cover change on the basis of AMSR-E soil moisture data with high spatial resolution. [Results] (1) All kinds of land cover existed three forms: afforestation trajectory; deforestation trajectory; permanent trajectory. (2) Soil moisture showed decreasing tendency in all the trajectories of cropland and forest. (3) For forest trajectories, the order of soil moisture was: permanent forest trajectory > afforestation forest trajectory > deforestation forest trajectory; while for cropland trajectory, the rank was deforestation cropland trajectory > afforestation cropland trajectory > permanent cropland trajectory. (4) The variation of soil moisture caused by land cover was affected by their ages. E. g., soil moisture under forest would take for more than 7 years to reach its maximum capacity, while in cropland, it was minimum at this age.

收稿日期: 2016-01-13

修回日期: 2016-03-11

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项“全球气候背景下基于多源遥感数据的地表关键参量反演研究”(KYZ201522); 国家自然科学基金项目(41571171; 41171071); 江苏高校优势学科建设工程项目

第一作者: 辛强(1988—), 男(汉族), 山东省济南市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤湿度遥感反演。E-mail: xinqiang0711@126.com。

通讯作者: 李兆富(1977—), 男(汉族), 山东省新泰市人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: lizhaofu@njau.edu.cn。

[Conclusion] As the main land cover types in East China, forest and farmland's trajectory in years of 2003—2010 had a downward trend of soil moisture. With the prolonging of forest growth and cultivation, soil moisture of forest and cropland were increased and decreased, respectively, and reached their maximum and minimum values after 7 years of growth and cultivation, respectively.

Keywords: Eastern China; soil moisture; trajectory analysis

土壤水分是描述地表和大气之间能量、水分交换的关键参数,对于水文、生态以及农林牧业等研究具有重要意义^[1]。微波遥感技术的发展,为区域尺度的土壤水分信息的获取提供了有效手段^[2],极大促进了土壤水分的研究进程。国内外许多学者^[3-4]开始使用遥感手段进行土壤水分的研究。在现有的土壤水分的研究中,关于土壤水分影响因素的研究是极其重要的研究内容。

综合现有的国内外研究,土壤水分的主要影响因素可以分为 2 个方面:自然因素以及人为因素^[5]。自然因素主要包括降水、土壤质地等,其中降水是主要影响因子^[6];人为因素则主要指由于土地覆被变化对土壤水分含量的影响^[7]。自然因素和人为因素相互影响,相互作用,共同决定了土壤水分含量。在大尺度区域内,揭示单一影响因素对土壤水分含量的影响存在较大难度。定量表示单一影响因素对土壤水分影响机理对于有效管理水资源具有重要作用^[8]。目前人为因素,即土地覆被变化对土壤水分影响的研究逐渐得到重视。土地覆被变化会对田间持水量以及水分渗透产生影响^[9],进而影响土壤水分含量。现有的关于土地覆被变化对土壤水分的影响研究大多数集中于不同土地利用类型中土壤水分多样性的相互比较^[10],而对于揭示在土壤水分变化过程中,土地覆被变化影响的研究却比较缺乏。

轨迹分析为描述土地覆被变化提供了很好的手段^[11]。变化轨迹分析方法是用来描述景观格局在时间尺度上发生的变化,也就是对景观变化时间格局的动态刻画。轨迹分析属于一种综合的方法框架,通过栅格叠加计算将不同节点的栅格状态记录在一个新的变化轨迹图谱中,利用相关统计方法,对变化轨迹图谱进行空间分析,以期能够描述研究对象的时空动态变化特征^[12],并且利用地理信息系统空间分析功能进行驱动机制研究。该方法并非通过割裂基本变化过程来获取信息规律,因而在最大程度上保障了动态变化过程的完整性^[13]。

目前国内关于土壤水分的研究,大多数选择西部

及西北部干旱以及半干旱地区作为研究区域^[10],而对于华东地区土壤水分的研究比较少见,邴飞龙等^[14]的研究中指出,华东地区土壤水分蒸散量较高,土壤水分变化剧烈。同时,华东地区土地覆被类型多样,变化较为明显,针对华东地区开展土地覆被变化对土壤水分的影响具有重要的实际意义。因此,本研究利用轨迹分析方法描述 2003—2010 年华东地区土地覆被变化,在 AMSR-E 土壤水分降尺度反演结果的基础上,分析土地覆被变化过程对土壤水分的影响,以期能够揭示土地覆被变化对土壤水分的影响机理。

1 研究区与数据

1.1 研究区域

选取华东地区为研究区域,包括山东省、江苏省、安徽省、浙江省、江西省、福建省和上海市,面积为 $7.98 \times 10^5 \text{ km}^2$,经纬度范围 $24^\circ 27' 36''$ — $38^\circ 14' 24'' \text{N}$, $113^\circ 32' 24''$ — $122^\circ 42' 36'' \text{E}$ 。研究区内土地覆被类型为:耕地、林地、草地、水体以及其他用地类型。其中,耕地主要分布在山东、江苏、安徽以及浙江省北部,林地主要位于江西、福建以及浙江省南部区域。地势的总体特点是南北高、中部低,根据地形地貌特点大致可分为 3 部分:北部为黄淮平原,中部为长江中下游平原,南部为低山丘陵地区,最大高程为 2 018 m,地形地貌差异显著,土壤水分含量差异较大。本研究区还属于经济发达地区,人为活动影响剧烈,土地利用变化显著,对于区域土壤水分含量具有重要影响。

1.2 研究数据

1.2.1 AMSR-E 土壤水分降尺度反演数据 研究区土壤水分数据选择的是基于 AMSR-E 三级地表土壤水分产品的降尺度结果(图 1)。AMSR-E 土壤水分数据是目前使用较为广泛的微波遥感数据^[15],空间分辨率为 25 km,难以满足研究精度需要。本研究使用的是经过降尺度后的土壤水分反演结果,降尺度原理是基于曹永攀等^[1]提出的利用温度植被干旱指数 TVDI 与土壤水分之间的负相关关系,将 AMSR-E 土壤水分数据空间分辨率提高至 1 km。

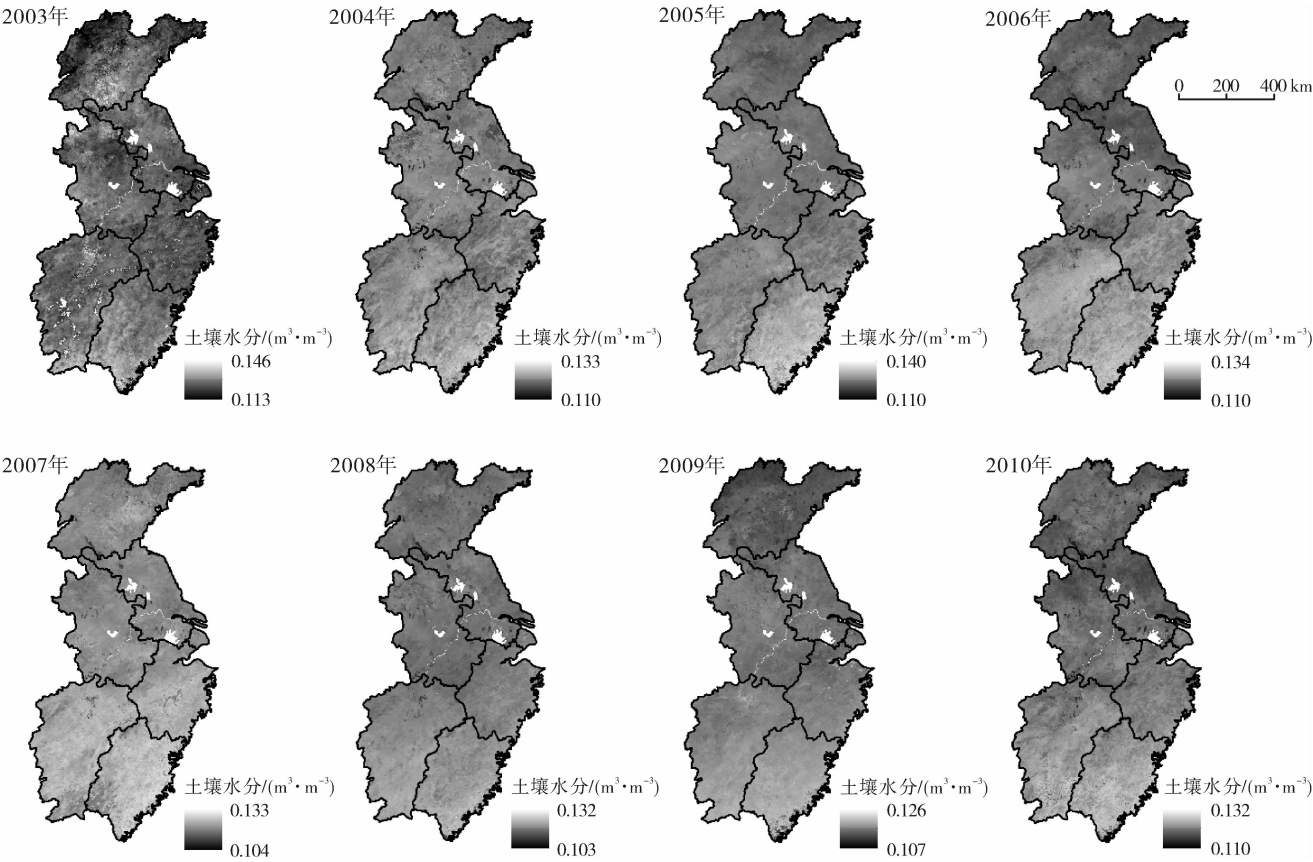


图 1 华东地区 2003—2010 年土壤水分降尺度结果

利用气象数据共享网提供的地面实测土壤水分数据对降尺度后的土壤湿度反演结果进行验证,并选取以下几个参数:绝对系数 R^2 , 相对误差 REVR, 绝对误差 ABVR, 均方根误差 RMSE 以及最大偏差 $\max E$ 和最小偏差 $\min E$ 定义地面土壤水分 X , 降尺度反演结果为 X_0 , N 是参与比较的样本数, 此处即地面土壤水分测量数目, 计算公式定义为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - X_0)^2} \quad (1)$$

$$\text{ABVR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{abs}(X_i - X_0) \quad (2)$$

$$\text{REVR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{abs}\left(\frac{X_i - X_0}{X_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$\max E = \max(X - X_0) \quad (4)$$

$$\min E = \min(X - X_0) \quad (5)$$

验证结果如表 1 所示。土壤水分反演结果与地面实测土壤水分数据之间的验证结果证明:降尺度土壤水分结果具有较高的精度,线性回归拟合决定系数 R^2 均在 0.8 以上, 并且 REVR, ABVR, RMSE, $\max E$, $\min E$ 均在误差允许的范围内, 表明降尺度土壤水分结果与地面土壤水分数据具有较好的线性相关性, 降尺度结果能够描述土壤湿度的变化情况。

表 1 年际尺度下土壤水分降尺度结果误差分析

年份	N	R^2	REVR	ABVR	RMSE	$\max E$	$\min E$
2003	67	0.82	0.68	0.069	0.071	0.019	0.009
2004	74	0.71	0.64	0.067	0.073	0.022	0.013
2005	79	0.79	0.72	0.071	0.067	0.025	0.015
2006	69	0.8	0.74	0.075	0.077	0.024	0.007
2007	81	0.83	0.73	0.074	0.076	0.021	0.011
2008	83	0.85	0.76	0.073	0.083	0.019	0.014
2009	89	0.81	0.69	0.072	0.079	0.02	0.012
2010	85	0.76	0.65	0.068	0.072	0.022	0.017

注: N 为样本数, R^2 绝对系数, REVR 为相对误差, ABVR 为绝对误差, RMSE 为均方根误差, $\max E$ 为最大偏差, $\min E$ 为最小偏差。

1.2.2 MODIS 数据 选用 MODIS 三级土地覆被类型产品 $MCD_{12}Q_1$ 来描述华东地区土地覆被类型并计算土地覆被类型轨迹变化。由于 $MCD_{12}Q_1$ 土地覆被类型产品是经过验证的三级产品,轨迹分析则是基于 $MCD_{12}Q_1$ 进行的栅格运算,因此能够保证后续轨

迹变化的精确性。结合 $MCD_{12}Q_1$ 的 IGBP 分类体系,参考中国科学院“国家资源年卫星遥感宏观调查与动态研究”制定的土地资源分类系统^[5,16],将其一级类定义为本研究的分类体系,即:林地、耕地、草地、水体、建设用地以及其他用地类型(表 2)。

表 2 研究区土地利用分类体系

合并后分类体系	$MCD_{12}Q_1$ IGBP 分类体系	合并后分类体系	$MCD_{12}Q_1$ IGBP 分类体系
耕 地	农 田	林 地	常绿针叶林
	农田/自然植被拼接		常绿阔叶林
草 地	密闭灌丛		落叶针叶林
	稀疏灌丛		落叶阔叶林
	木本热带草原		混交林
	热带草原	水 体	水 体
	草 地		永久湿地
建筑用地	城市和建筑用地	其他用地类型	雪和冰
			稀疏植被

2 研究方法

土地覆被变化轨迹的含义是指对于给定的像元,研究它在一定的时间内所发生的所有的土地利用/覆被类型的转变过程^[17]。根据土地覆被相互转化可以将研究区域划分为不同组分,这种方法为表述不同土地覆被之间的变化提供了有效的手段^[18]。当研究区土地利用类别数小于 10 时,利用栅格运算描述栅格的轨迹变化^[19]:

$$T_{ij} = (G_1)_{ij} \times 10^{n-1} + (G_2)_{ij} \times 10^{n-2} + \cdots + (G_n)_{ij} \times 10^{n-n} \quad (6)$$

式中: T_{ij} ——土地覆被变化轨迹分析结果中第 i 行、第 j 列栅格的代码值,代表土地利用变化过程,没有实际的数学意义; n ——时间节点个数; $(G_1)_{ij}$, $(G_2)_{ij}$, \cdots , $(G_n)_{ij}$ ——时间节点的栅格图像上相应栅格土地利用类型代码值,在本研究中即 2003—2010 年每年的 $MCD_{12}Q_1$ 栅格影像。每种土地覆被类型均有 3 种轨迹变化过程:研究年限内面积增加的轨迹变化、面积减少的轨迹变化、研究年限内未发生面积变化的轨迹。

由于土地覆被变化导致的土壤水分变化量可以由以下公式计算^[9]:

$$\Delta SSM_{LC} = SSM_{LC} - SSM_{\text{permanent}} \quad (7)$$

式中: ΔSSM_{LC} ——由于土地覆被变化造成的土壤水分的变化量; SSM_{LC} ——在某种土地覆被类型变化轨迹过程中的土壤水分含量; $SSM_{\text{permanent}}$ ——在研究年间没有发生轨迹变化的某种土地覆被类型下的土壤水分含量。以耕地为例, ΔSSM_{LC} ——在 2003—2010 年在耕地的 3 种轨迹变化过程,即:耕地

面积增加,耕地面积减少和未发生变化的耕地 3 种过程中土壤水分含量与耕地面积未发生变化下的土壤水分含量的差值,该差值也就是由于耕地类型的变化带来的土壤水分含量的变化。

3 结果与讨论

3.1 华东地区土地覆被类型变化

在对 MODIS $MCD_{12}Q_1$ 土地覆被类型产品进行重分类的基础上,统计了 2003—2010 年华东地区 6 种土地利用类型的面积比例(图 2)。

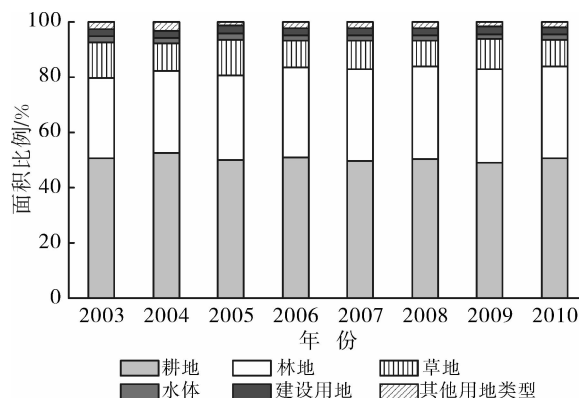


图 2 华东地区 2003—2010 年土地覆被类型面积比例

由图 2 可以看出,耕地为华东地区主要土地利用类型,主要分布在山东、江苏、安徽以及上海等地,研究年限内耕地面积呈现出增长的趋势,面积比例由最初的 50.53% 增长至 2010 年的 50.77%,耕地面积最小值为 2009 年的 49.18%,最大值为 2004 年的 52.50%,面积变化最大值为 8 300 km²。

林地是华东地区第 2 大用地类型,主要分布在浙

江、福建、江西等地,面积比例也呈现出增长趋势,由 2003 年的 29.14% 增长至 2010 年 33.18%,2008 年林地面积最大,所占比例为 33.66%,最小值出现在 2003 年,研究年限内林地面积变化最大量为 11 300 km²。

其他用地类型,如草地、水体、建设用地等都存在不同程度面积变化。

3.2 华东地区土地覆被类型轨迹变化

通过轨迹变化计算公式得到 2003—2010 年 6 种土地覆被类型的轨迹变化,同时结合华东地区土地覆被类型的状况,统计了在 2003—2010 年耕地和林地的轨迹变化过程,分别包括 3 种类型:耕地/林地面积增加;耕地/林地面积退化;耕地/林地未发生变化(表 3—4)。

表 3 华东地区耕地轨迹变化

耕地面积减少				耕地面积增加			
ID	轨迹代码	变化类型	面积比例/%	ID	轨迹代码	变化类型	面积比例/%
1	66666644	耕-耕-耕-耕-耕-耕-草-草	0.253	1	46666666	草-耕-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.511
2	66666664	耕-耕-耕-耕-耕-耕-耕-草	0.248	2	44666666	草-草-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.184
3	66666444	耕-耕-耕-耕-耕-草-草-草	0.168	3	44466666	草-草-草-耕-耕-耕-耕-耕	0.116
4	66664444	耕-耕-耕-耕-草-草-草-草	0.129	4	44444666	草-草-草-草-草-耕-耕-耕	0.104
5	66444444	耕-耕-草-草-草-草-草-草	0.117	5	44444466	草-草-草-草-草-草-耕-耕	0.092
6	66644444	耕-耕-耕-草-草-草-草-草	0.099	6	44444446	草-草-草-草-草-草-草-耕	0.091
7	63333333	耕-林-林-林-林-林-林-林	0.071	7	44446666	草-草-草-草-耕-耕-耕-耕	0.077
8	64444444	耕-草-草-草-草-草-草-草	0.07	8	36666666	林-耕-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.047
9	66666633	耕-耕-耕-耕-耕-耕-林-林	0.067	9	33333366	林-林-林-林-林-林-耕-耕	0.024
10	66333333	耕-耕-林-林-林-林-林-林	0.056	10	33366666	林-林-林-耕-耕-耕-耕-耕	0.022
11	66666333	耕-耕-耕-耕-耕-林-林-林	0.055	11	44444436	草-草-草-草-草-草-林-耕	0.022
12	66666663	耕-耕-耕-耕-耕-耕-耕-林	0.047	12	22666666	其-其-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.019
13	66663333	耕-耕-耕-耕-林-林-林-林	0.033	13	22266666	其-其-其-耕-耕-耕-耕-耕	0.015
14	66633333	耕-耕-耕-林-林-林-林-林	0.03	14	33666666	林-林-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.015
15	66666634	耕-耕-耕-耕-耕-耕-林-草	0.028	15	33333666	林-林-林-林-林-耕-耕-耕	0.015
16	66666622	耕-耕-耕-耕-耕-耕-其-其	0.019	16	33336666	林-林-林-林-耕-耕-耕-耕	0.013
17	66666222	耕-耕-耕-耕-耕-其-其-其	0.018	17	26666666	其-耕-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.012
18	66444333	耕-耕-草-草-草-林-林-林	0.017	18	44433366	草-草-草-林-林-林-耕-耕	0.011

注:耕:耕地;林:林地;草:草地;其:其他用地类型。

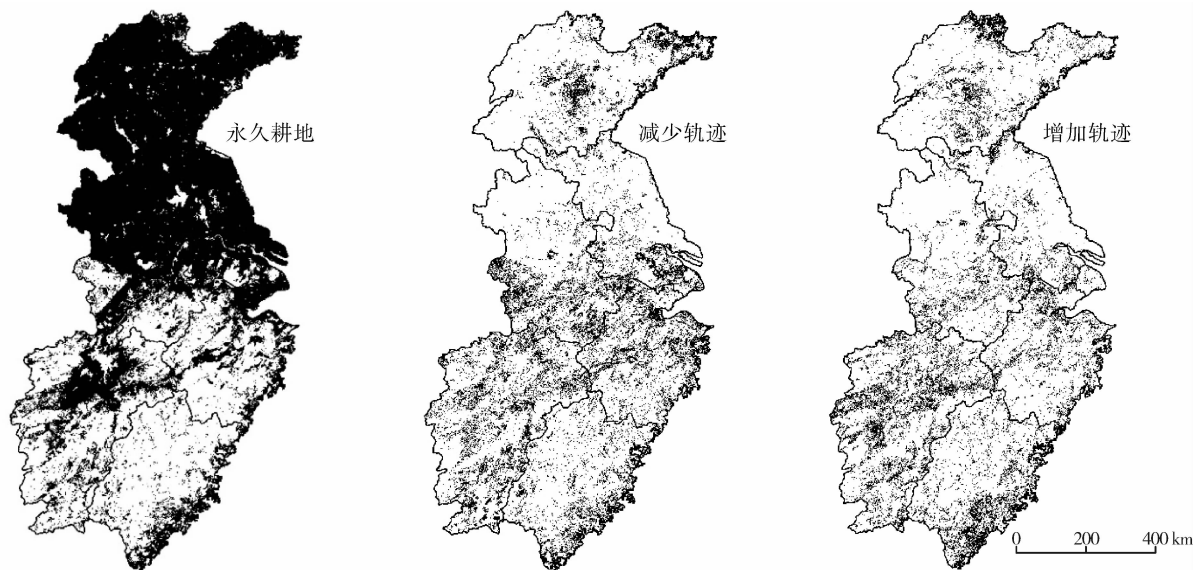
表 4 华东地区林地轨迹变化

林地面积减少				林地面积增加			
ID	轨迹代码	变化类型	面积比例/%	ID	轨迹代码	变化类型	面积比例/%
1	33333344	林-林-林-林-林-林-草-草	0.161	1	43333333	草-林-林-林-林-林-林-林	0.621
2	33333334	林-林-林-林-林-林-林-草	0.146	2	44433333	草-草-草-林-林-林-林-林	0.448
3	34444444	林-草-草-草-草-草-草-草	0.106	3	44333333	草-草-林-林-林-林-林-林	0.295
4	33333444	林-林-林-林-林-草-草-草	0.095	4	22333333	其-其-林-林-林-林-林-林	0.254
5	33444444	林-林-草-草-草-草-草-草	0.090	5	44444333	草-草-草-草-草-林-林-林	0.200
6	33344444	林-林-林-草-草-草-草-草	0.072	6	44443333	草-草-草-草-林-林-林-林	0.195
7	33334444	林-林-林-林-草-草-草-草	0.052	7	44444433	草-草-草-草-草-草-林-林	0.152
8	36666666	林-耕-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.047	8	23333333	其-林-林-林-林-林-林-林	0.132
9	33333336	林-林-林-林-林-林-林-耕	0.024	9	44444443	草-草-草-草-草-草-草-林	0.121
10	33333366	林-林-林-林-林-林-耕-耕	0.024	10	63333333	耕-林-林-林-林-林-林-林	0.071
11	33366666	林-林-林-耕-耕-耕-耕-耕	0.022	11	66666633	耕-耕-耕-耕-耕-耕-林-林	0.067
12	33333322	林-林-林-林-林-林-其-其	0.019	12	66333333	耕-耕-林-林-林-林-林-林	0.056
13	36664444	林-耕-耕-耕-草-草-草-草	0.017	13	66666333	耕-耕-耕-耕-耕-林-林-林	0.055
14	33333332	林-林-林-林-林-林-林-其	0.016	14	42333333	草-其-林-林-林-林-林-林	0.050
15	33666666	林-林-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.015	15	66666663	耕-耕-耕-耕-耕-耕-耕-林	0.047
16	33333666	林-林-林-林-林-耕-耕-耕	0.015	16	66663333	耕-耕-耕-耕-林-林-林-林	0.033
17	36444444	林-耕-草-草-草-草-草-草	0.014	17	66633333	耕-耕-耕-林-林-林-林-林	0.030
18	33336666	林-林-林-林-耕-耕-耕-耕	0.013	18	22233333	其-其-其-林-林-林-林-林	0.027

在研究年限内,未发生变化的耕地(轨迹代码为 66 666 666)面积为 332 906.5 km²,未发生变化的林地(轨迹代码为 33 333 333)面积为 178 052.75 km²,分别占据研究区面积的 42.12%和 22.53%。在耕地面积减少的轨迹变化过程中,耕地转化为草地、林地以及其他用地类型的比例分别为 28.57%,64.29%和 7.14%,在耕地面积增加的轨迹变化过程中,由草地、林地、其他用地类型转化为耕地的比例为 50%,33.33%,16.67%。而林地面积减少的轨迹变化过程中,林地转化为草地、耕地和其他用地类型的比例为 50%,38.89%和 11.11%,在林地面积增加的轨迹变化过程中,由草地、耕地、其他用地类型转化为耕地的比例分别为 38.36%,43.18%,18.18%。

图 3—4 表示了华东地区耕地和林地的轨迹变化的空间分布。

由图 3—4 分析可知,在研究年限内研究区未发生转化的耕地轨迹主要分布在山东、安徽、江苏以及江西省北部部分地区;耕地面积减少和增加的轨迹空间分布较为分散,主要位于江西、浙江、福建省等部分地区,此外江苏、江西以及山东省等小部分区域也分布有耕地变化的轨迹。研究区林地面积未发生变化的轨迹主要分布于浙江、福建、江西省大部分区域以及安徽省南部地区;林地面积减少的轨迹零散分布于浙江、福建、江西以及安徽省部分地区,林地面积增加的轨迹则集中分布在浙江、福建、江西以及安徽省南部等区域。



注:各图深色区域即为永久耕地、耕地面积减少轨迹和耕地面积增加轨迹。下同。

图 3 华东地区耕地轨迹变化过程空间分布

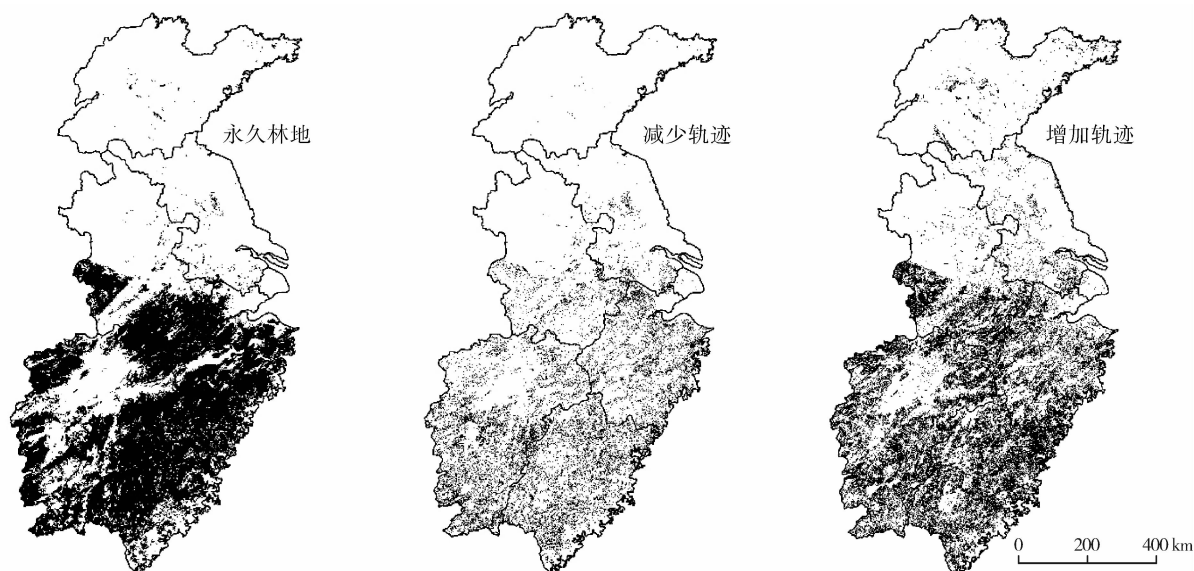


图 4 华东地区林地轨迹变化过程空间分布

3.3 土地覆被变化对土壤水分的影响

提取研究年限内由于耕地和林地的轨迹变化而造成的土壤水分含量的变化情况(图5—6)。在耕地和林地的轨迹变化过程中,土壤水分与降水量表现出相同的变化趋势。在林地的轨迹变化过程中,未发生轨迹变化的林地土壤水分含量最高,其次是林地面积增加过程,林地面积减少的过程土壤水分含量最少。此外,在林地的3种轨迹变化过程中,土壤水分表现出相同的变化趋势,但是3种轨迹的土壤水分变化率是不同的。在未发生轨迹变化的林地中,土壤水分变化率为4.11%,其次是林地增加的过程,变化率为5.79%,变化率最大的是林地面积减少的过程,土壤水分的变化率为6.15%,不同的土壤水分变化率表明林地能够减少土壤水分的流失,林地退化则增加了土壤水分的流失量。在耕地的轨迹变化过程中,耕地的土壤水分含量低于林地,在耕地的3种轨迹变化形态中,土壤水分均表现出相似的变化趋势,土壤水分含量最高的是耕地面积减少的过程,含量最低的是未发生轨迹变化的耕地,这是由于耕地保持土壤水分能力较弱,在耕地面积减少的过程,尤其是在耕地转化为林地的过程中,增强了保持土壤水分的能力,因此在耕地面积增加的轨迹变化过程中有较高的土壤水分含量。

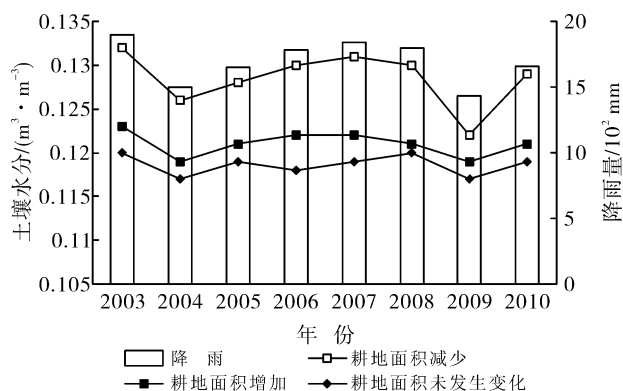


图5 华东地区耕地轨迹变化中土壤水分变化统计

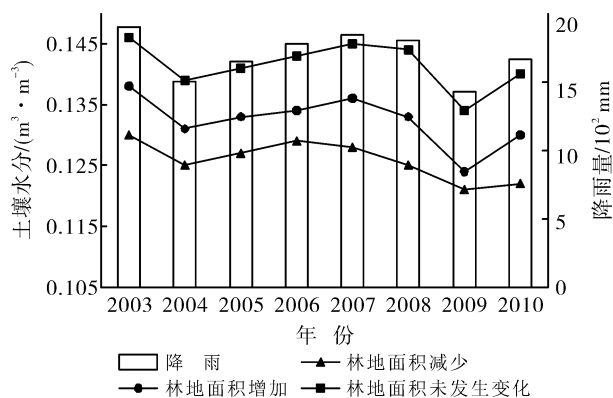


图6 华东地区林地轨迹变化中土壤水分变化统计

在林地的轨迹变化过程中,永久林地土壤水分含量最高,而且在林地增加的过程中土壤水分含量也低于永久林地中的水分含量,这主要归因于育林年限时间长短^[20]。基于此,根据土地覆被类型的轨迹变化,分别将耕地和林地面积增加的轨迹变化类型变化分为7组,例如:轨迹变化类型“*****-林”表示育林年限为1a,“*****-林-林”表示育林年限为2a,耕地类型同样如此:“*****-耕”表示耕种年限为1a,“*****-耕-耕”表示耕种年限为2a,提取耕地和林地不同年限下的土壤水分含量(图7)。在耕种年限内,耕地的土壤水分含量由0.13 m³/m³减少至0.112 m³/m³,在育林年限内,林地的土壤水分含量由0.125 m³/m³增加至0.142 m³/m³。在林地增加的轨迹变化过程中,土壤水分含量逐年增加,但其最大值仍然低于永久林地中的土壤水分,表明林地增加能够提高保持土壤水分的能力,但是这种能力与育林年限紧密相关,至少需要7a时间才可以达到其最大蓄水能力。在耕地面积增加的轨迹变化过程中,土壤水分含量逐年减少,在第7a达到土壤水分含量最小值,此时土壤水分含量仍然高于未发生轨迹变化的耕地中土壤水分含量,这表明耕地保持土壤水分能力较弱,在耕地面积增加的过程中,减少了土壤水分含量,这种变化过程与耕种年限有关,耕种年限越长,土壤水分含量越低。

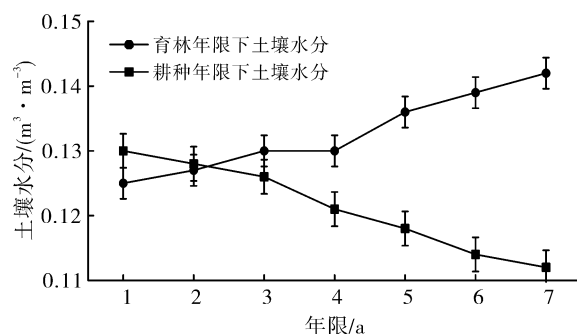


图7 不同育林/耕种年限下土壤水分含量

以未发生轨迹变化的林地来说,其土壤水分含量的变化是由多种因素共同作用的结果,但是在同种土地利用类型不同轨迹变化过程中,土壤水分含量的变化则可以归因于土地覆被变化的影响^[5]。在林地面积增加的轨迹变化过程,土壤水分变化率为13.6%;耕地面积增加的轨迹变化过程,土壤水分变化率为13.85%。总体来说,林地具有很好的保持土壤水分的能力,在林地面积增加和林地面积减少的轨迹变化过程中土壤水分含量均低于永久林地。耕地本身对于保持土壤水分的能力较弱,因此其土壤水分含量低

于林地,而且在耕地面积增加的轨迹过程中,土壤水分逐渐减少。在耕地和林地的轨迹变化过程中,土壤水分的变化均与年限长短有关,随着育林年限增长,林地保持土壤水分能力逐渐增强,土壤水分含量逐年升高(图 7);而耕地则恰恰相反,随着耕种年限的增长,土壤水分含量呈现出逐渐下降的趋势(图 7)。

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 华东地区土地覆被类型以耕地和林地为主,土地覆被类型变化显著。在 2003—2010 年,耕地面积比例由 50.53% 增长至 50.77%,面积变化最大值为 8 300;林地面积呈增长趋势,面积变化最大量为 11 300。

(2) 2003—2010 年耕地和林地轨迹变化过程显著,主要包括 3 种形式:耕地/林地面积增加,耕地/林地面积减少,耕地/林地面积未发生变化。在耕地面积减少的轨迹变化过程中,以耕地转化为林地所占比例为 64.29%;在耕地面积增加的轨迹过程中,由林地转化而来的耕地所占比例为 33.33%。在林地面积减少的轨迹变化过程中,林地转化为耕地的比例为 38.89%,在林地面积增加的轨迹变化过程中,由耕地转化而来的林地所占比例为 43.18%。

(3) 在所有的轨迹变化过程中,土壤水分均呈现出下降趋势。在林地的 3 种轨迹变化过程中,土壤水分含量最高的是林地面积未发生变化的轨迹过程,林地面积减少的过程土壤水分含量最少,这表明林地在保持土壤水分方面的作用。在耕地 3 种轨迹变化过程中,耕地面积减少过程土壤水分含量最高,耕地面积未发生变化的轨迹变化过程土壤水分含量最低。

(4) 在林地面积增加的轨迹变化过程中,土壤水分含量由 $0.125 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 增长至 $0.142 \text{ m}^3/\text{m}^3$;在耕地面积增加的轨迹变化过程,土壤水分含量由 $0.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 减少至 $0.112 \text{ m}^3/\text{m}^3$,该变化过程与时间年限有关,随着育林年限增长,其保持土壤水分能力逐渐增强,土壤水分含量逐年升高,至少需要 7 a 时间可以达到其最大蓄水能力。耕地保持土壤水分能力随着耕种年限增长呈下降趋势,在第 7 a 达到土壤水分含量最小值。

4.2 展望

将轨迹分析方法和土壤水分结合起来,描述土地覆被变化对土壤水分的影响,该方法所需参数较少,在计算轨迹变化的过程中所需数据均为 MODIS 产品数据,数据获取快捷方便,并且处理较为简单,是一种简便又不失其物理意义的好方法。但综合来说,还

是存在一定的不足之处,即:在计算轨迹变化时,是在 MODIS $\text{MCD}_{12}\text{Q}_1$ 分类体系的基础上进行重新分类。而华东地区地形地貌形态多样,不同地形地貌对不同地表覆盖类型下土壤水分的敏感性差别更大,如果将华东地区不同地形地貌和轨迹分析结合起来,探讨不同地形地貌下土地覆被类型变化对土壤水分的影响,会具有更加现实的意义。但是由于华东地区地形多样,在对华东地区地形地貌分类的过程中结合土地覆被类型变化的过程存在较大难度。在今后的研究中可以开展这方面的工作,考虑研究不同地形地貌类型下的土地覆被轨迹变化,从而说明不同地形地貌下的土地覆被变化过程对土壤水分的影响。

致谢: National Snow and Ice Data Center 提供了 AMSR-E 土壤水分数据,美国宇航局提供了土地覆被类型数据 $\text{MCD}_{12}\text{Q}_1$,中国气象科学数据共享服务网提供了地面土壤水分测量数据,谨此致谢!

[参 考 文 献]

- [1] 曹永攀,晋锐,韩旭军,等. 基于 MODIS 和 AMSR-E 遥感数据的土壤水分降尺度研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 590-597.
- [2] Durso G, Minacapilli M. A semi-empirical approach for surface soil water content estimation from radar data without a-priori information on surface roughness [J]. Journal of Hydrology, 2006, 321(1/4): 297-310.
- [3] Notarnicola C, Ventura B, Pasolli L, et al. Towards an operational daily soil moisture index derived from combination of MODIS, ASAR and AMSR-E data[C]. Geoscience & Remote Sensing Symposium IEEE International, 2010: 816-819.
- [4] Brocca L, Hasenauer S, Lacava T, et al. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115 (12): 3390-3408.
- [5] Feng Huihui, Liu Yuanbo. Trajectory based detection of forest-change impacts on surface soil moisture at a basin scale Poyang Lake Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 514(3): 337-346.
- [6] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. Science, 2004, 305(5687): 1138-1140.
- [7] Yang Lei, Wei Wei, Chen Liding, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 475(6): 111-122.
- [8] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its

- relationship to dominant spatial hydrological processes [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(1):113-134.
- [9] Wang, Shengping, Zhang, Zhiqiang, Mcvicar T R, et al. An event-based approach to understanding the hydrological impacts of different land uses in semi-arid catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 416(2): 50-59.
- [10] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4):515-519.
- [11] Beno't M, Lambin E F. Land-Cover-Change Trajectories in Southern Cameroon [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2000, 90(3):467-494.
- [12] Wang, Dongchuan, Gong, Jianhua, et al. Comparative analysis of land use/cover change trajectories and their driving forces in two small watersheds in the western Loess Plateau of China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21(4):241-252.
- [13] Zhou Q, Li Baolin, Kurban A. Trajectory analysis of land cover change in arid environment of China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(4): 1093-1107.
- [14] 邴龙飞,苏红波,邵全琴,等.近30年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(1):1-13.
- [15] Sridhar V, Jaksa W T A, Fang B, et al. Evaluating Bias-Corrected AMSR-E soil moisture using in situ observations and model estimates[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(3):1712-1717.
- [16] 胡恒智.基于MODIS的长三角地表温度时空变化研究[D].上海:上海师范大学,2013.
- [17] Lambin E F. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions [J]. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21(3):375-393.
- [18] Feng Huihui, Liu Huiping, Wu Lichun. Monitoring the relationship between the land surface temperature change and urban growth in Beijing, China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(10):4010-4019.
- [19] Wang Dongchuan, Gong Jianhua, Chen Liding, et al. Spatio-temporal pattern analysis of land use/cover change trajectories in Xihe watershed [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 14(1):12-21.
- [20] Bauhus J, Pare D, Cote L. Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(8/9):1077-1089.

(上接第30页)

[参 考 文 献]

- [1] 梁宏温,杨健基,温远光,等.桉树造林再造林群落植物多样性的变化[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(5):40-43.
- [2] 黄承标,刘运华,秦武明,等.3种植被恢复过程中水土流失规律的研究[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2010, 34(2):59-63.
- [3] 王会利,杨开太,黄开勇,等.广林巨尾桉人工林土壤侵蚀和养分流失研究[J]. *西部林业科学*, 2012, 41(4): 84-87.
- [4] 郭晋川,梁宏温,潘伟,等.两种森林集水区径流量及其径流过程初步分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 55-59.
- [5] 阳永泉,温远光,何斌,等.尾巨桉和厚荚相思人工林土壤肥力及其差异[J]. *林业科技开发*, 2010, 24(2):31-33.
- [6] 杜阿朋,韦东艳,张婧,等.不同造林措施对桉树人工林地土壤养分的影响[J]. *桉树科技*, 2012, 29(2):1-7.
- [7] 赵一鹤,杨时宇,周祥,等.巨尾桉工业原料林地与不同土地利用类型坡面产流产沙特征对比分析[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1):77-81, 88.
- [8] 覃其云,曹继钊,梁燕芳,等.桉树人工林水土流失及养分损耗研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(4): 1566-1568, 1578.
- [9] 黄承标,杨瑶青,温远光,等.不同更新方式巨尾桉人工林的水土流失规律[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1):43-46, 52.
- [10] 梁宏温,钟瀚涛,温远光,等.不同造林抚育措施对桉树人工林坡面径流特征的影响[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(11):2020-2025.
- [11] 中华人民共和国国家标准:地表水环境质量标准(GB3838-2002)[M].北京:中国环境科学出版社, 2002:13-26.
- [12] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999:7-39.
- [13] 中央气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,1979:28-31.
- [14] 杨凤根,赵燕容,郭晋川,等.广西速生桉树植区水库水化学特征及其氮来源研究[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(10):6-10.